

자동차 방진 고무 부품의 유한요소해석 및 피로수명평가

김 완 두[†] · 우 창 수 · 한 승 우

한국기계연구원

(1998년 5월 11일 접수)

Finite Element Analysis and Fatigue Life Evaluation of Automotive Rubber Insulator

W. D. Kim[†], C. S. Woo and S. W. Han

Korea Institute of Machinery & Materials, Yusung, Daejeon, Korea

(Received May 11, 1998)

요약 : 자동차의 고무부품 중의 하나인 스트라트방진고무의 특성 평가를 위하여 유한요소해석과 피로 수명시험을 실시하였다. 유한요소해석에 필요한 변형률에너지함수의 계수를 결정하기 위하여 인장, 압축 및 전단시험을 실시하였으며, 유한요소해석 결과로부터 변형 양상 및 취약 부위를 예측하였다. 부품의 피로수명시험 결과로부터 하중-수명 관계를 얻었으며, 피로파손 부위는 유한요소해석에서 예측된 취약 부위와 잘 일치하였다.

ABSTRACT : A strut rubber insulator is used in a suspension component of passenger cars. The uni-axial tension, compression, and the shear test were performed to acquire the constants of the strain energy functions which were Mooney-Rivlin model and Ogden model. The finite element analysis was executed to evaluate the behavior of deformation and stress distribution by using the commercial finite element code MARC ver K6.2. Also, the fatigue tests were carried out to obtain the fatigue life-load curve. The fatigue failure was initiated at the folded position of rubber, which was the same result predicted by the finite element analysis.

Keywords : Strut Rubber Insulator, Fatigue Life, Finite Element Analysis, Strain Energy Function, Mooney-Rivlin Model, Ogden Model.

I. 서 론

자동차에 사용되는 고무부품에는 고무재료가 지닌 특수한 성질인 고도의 신장성, 탁월한 탄성 복원 능력 및 진동 감쇄 특성 등으로 인하여 타이어, 엔진마운트

방진고무, 문밀봉장치(door seal), 댐퍼류 등 다양한 종류가 있다.¹

다른 기계류 부품과 마찬가지로 고무류 기계부품도 성능 향상과 품질 고도화의 요구에 따라 부품 개발시 고도의 설계 및 해석 기술이 요구되고 있는 실정이다. 근래에는 새로운 제품의 개발시 대부분 실제 제품의 제작에 앞서 예비 설계된 치수를 바탕으로 전산시뮬레

[†]대표저자

이션을 통하여 제품의 특성을 미리 예측하고 평가하는 소위 CAE(computer aided engineering) 개념을 도입하여 경비 절감과 시간 절약 등을 도모하고 있다. 그러나, 고무제품은 초탄성 특성을 지닌 고무 물성 모델화의 어려움과 고무 제품이 나타내는 비선형 대변형 거동 해석을 위한 유한요소해석 코드의 미비 등으로 인하여 경험적인 수법이나 실험에 의존하여 신제품을 개발해 오고 있는 실정이었다.

최근에는 비선형 대변형 유한요소해석 코드의 발전과 고무의 물성을 평가하는 다양한 모델의 개발 등에 관한 많은 연구 진척을 통하여 고무 부품의 설계 및 해석에도 컴퓨터시뮬레이션 방법이 잘 이용되고 있다.²⁻⁵

대부분 자동차에 사용되는 고무부품은 방진 역할을 담당하고 있으며, 자동차의 수명 동안 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 외부 하중에 대해 충분한 내구성이 보장되어야 한다. 내구성 평가에 대해서는 지금까지는 전적으로 시작품에 대한 실제 내구시험에 의존해 왔으며, 막대한 시간과 경비가 지출되어 오고 있었다. 최근에는 고무부품도 시편 상태의 수명선도로부터 부품의 피로수명을 예측하는 방법이 응용되고 있다.⁷

본 연구에서는 독립현가방식 승용차의 앞차축에 설치된 속업소버(shock absorber)를 차체에 고정시켜 주는 역할을 하는 strut rubber insulator를 대상으로 비선형 대변형 유한요소 해석코드를 이용한 전산해석을 수행하여 부품의 정적 특성을 예측하여 실제 시험 결과와 비교 검토하고 최대변형률 및 응력이 발생되는 취약 부위를 예측하였다. 유한요소 해석에 필요한 고무재료 상수 즉, 변형률에너지함수의 계수를 결정하기 위하여 1축 인장압축시험과 전단시험을 위한 시편을 설계 제작하고 실제 시험을 실시하였다. 또한, 동 부품의 피로시험을 통하여 하중-수명 관계를 구하였으며 전산해석에서 구한 취약부위와 피로파손부위를 비교검토하였다.

II. 고무재료의 초탄성 거동 및 재료상수

1. 변형률에너지함수

일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 범위 내에서 원래의 상태로 되돌아오는 탄성거동을 나타낸다. 고무 재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성 거동을 나타내는 초탄성(hyper-elastic)특성을 지닌다.

탄성이론에 따르면 탄성재료의 거동은 변형률에너지함수(strain energy function, 이하에서 SEF로 호칭)로서 나타낼 수 있다. 고무재료의 거동은 비선형, 비압축성, 대변형의 특성을 지니고 있으며, 그 양상이 고무의 성분에 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 시험으로부터 구한 하중-변형 관계를 가장 적절히 표현하는 SEF를 찾는 일이 중요한 연구대상이 되고 있다.^{7,8}

SEF(W)는 탄성학에 근거를 둔 구성방정식에 의해 연신률불변량(invariant of stretch) 또는 주연신률(principal stretch)의 함수로 나타낼 수 있다.

연신률불변량의 함수로서의 SEF;

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \tag{1}$$

주연신률의 함수로서의 SEF;

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \tag{2}$$

여기서, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주연신률이다. 고무 유사재료의 응력-변형률 관계식은 Rivlin에 의해 정리되었으며 재료가 등방성인 경우 좌표축에 무관하게 주연신률에 대한 불변량 I_1, I_2, I_3 는 다음식으로 정의된다.⁹

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \tag{3}$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \tag{4}$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \tag{5}$$

한편, 대부분의 고무 재료는 비압축성이므로 체적계수(bulk modulus)는 전단계수(shear modulus) 보다 상당히 크며 재료가 많이 구속되어 있지 않은 경우에는 비압축성의 가정이 타당함이 알려져 있다. 비압축성을 만족하려면 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$, 즉 $I_3=1$ 이며 다음 관계식이 성립한다.

$$I_2 = 1/\lambda_1^2 + 1/\lambda_2^2 + 1/\lambda_3^2 \quad (6)$$

연신률불변량의 함수로 표시되는 대표적인 SEF는 Rivlin 함수와 주연신률의 함수로 표시되는 대표적인 SEF는 Ogden 함수가 있다.

i) Rivlin 함수

$$W = W(I_1, I_2) = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j \quad (7)$$

ii) Ogden 함수

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (8)$$

여기서, C_{ij} , α_n , μ_n 는 시험결과로부터 결정되는 재료상수이다.

Rivlin함수 급수는 변형률불변량(I)의 차수나 연신률(λ)의 차수를 기준으로 전개된다. 전자의 경우는 2항 또는 3항의 상수를 지닌 Mooney-Rivlin모델과, 후자의 경우는 하나의 상수로 거동을 표현하는 Neo-Hookean모델과 James등이 제안한 5항 모델, 그리고 3항으로 구성된 Yeoh모델 등이 흔히 사용되고 있으며, 급수의 차수를 증가시키면 피팅에 의한 계수 결정 특성상 시험데이터 범위 내에서는 재료의 거동을 잘 표현할 수 있지만 시험데이터 범위 밖에서는 오히려 더 큰 오차를 가지게 될 수도 있다.

각각의 전개식은 다음과 같다.

• Neo-Hookean 모델 :

$$W = C_{10}(I_1-3) \quad (9)$$

• Mooney-Rivlin 모델 :

$$W = C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) \quad (10)$$

• 3항Mooney-Rivlin 모델 :

$$W = C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + C_{11}(I_1-3)(I_2-3) \quad (11)$$

• 5항 Mooney-Rivlin모델 :

$$W = C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + C_{11}(I_1-3)(I_2-3) + C_{20}(I_1-3)^2 + C_{30}(I_1-3)^3 \quad (12)$$

• Yeoh 모델 :

$$W = C_{10}(I_1-3) + C_{20}(I_1-3)^2 + C_{30}(I_1-3)^3 \quad (13)$$

Ogden모델은 최근 널리 사용되고 있는 모델이며, O-ring, Seal 및 기타 고무부품의 해석에 자주 이용되고 있다. 단순인장의 경우 700%의 변형률까지도 잘 맞으며, 미소한 압축성 재료에 대해서 비교적 잘 맞는 것으로 보고되고 있다.¹⁰

2. 재료시험 및 상수 결정

고무의 재료시험으로부터 얻어지는 데이터는 하중 상태에 따른 응력(공칭응력; σ , 진응력; t)과 연신률(λ)과의 관계이다. 변형률에너지함수의 상수는 시험 데이터와 변형률에너지함수로부터 구한 응력과 연신률과의 오차를 최소화시킴으로서 결정된다.

Rivlin함수로부터 산출되는 주응력의 차이는 다음과 같다.

$$(t_i - t_k) = 2(\lambda_i^2 - \lambda_k^2) \frac{\partial W}{\partial I_1} - 2(\lambda_i^{-2} - \lambda_k^{-2}) \frac{\partial W}{\partial I_2} \quad (14)$$

여기서, t_i 는 변형된 치수에 대한 주응력(진응력)이다.

Ogden 함수로부터 산출되는 주응력 차이는 다음과 같다.

$$t_i - t_k = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_i^{\alpha_n} - \lambda_k^{\alpha_n}) \quad (15)$$

Rivlin의 변형률에너지함수를 이용할 경우, 응력과 연신률의 관계는 식 (7)을 식 (14)에 대입함으로써 구할 수 있으며, 상수 C_{ij} 에 대한 1차 연립방정식이 유도된다. 일반적으로 상수의 수보다 식의 수가 많아져 선형최소사승법(linear least square method)을 이용하여 값을 결정할 수 있다.

Ogden 함수를 이용할 경우 식 (8)을 식 (15)에 대입함으로써 응력과 연신률의 관계를 구할 수 있으며, 계수 α_n, μ_n 에 대한 비선형 연립방정식이 유도된다. 따라서, 비선형 피팅 방법인 Levenberg-Marquardt 기법 또는 Downhill-Simpson 기법을 이용하여 이 계수를 결정할 수 있다.

본 연구에서는 연구 대상 부품과 같은 성질을 갖는 고무 시편을 제작하여 1축 인장압축시험과 단순전단 시험을 실시하였다.¹¹ 시험결과로부터 구한 응력-변형률 데이터를 이용하여 고무의 물성 상수를 결정하였

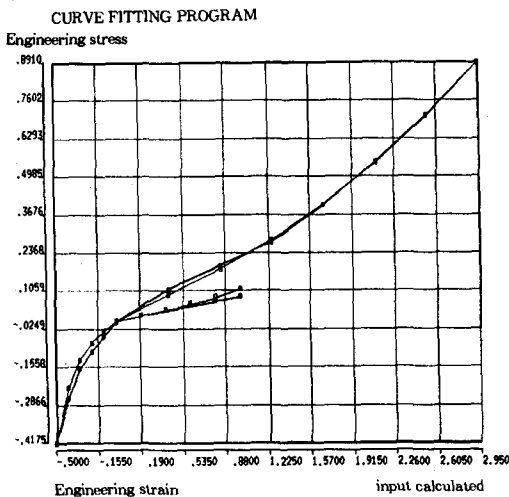


Fig. 1. Curve fitting by Mooney-Rivlin model.

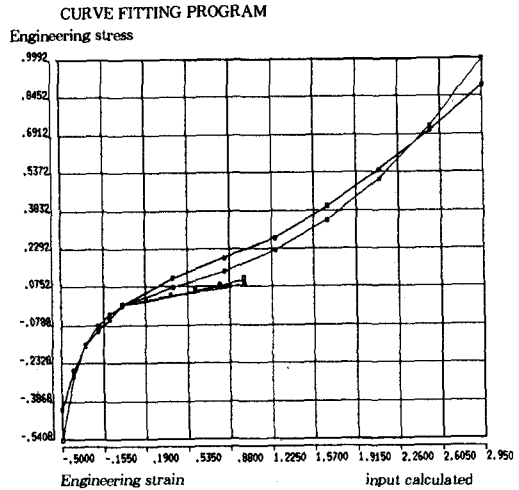


Fig. 2. Curve fitting by Ogden model I.

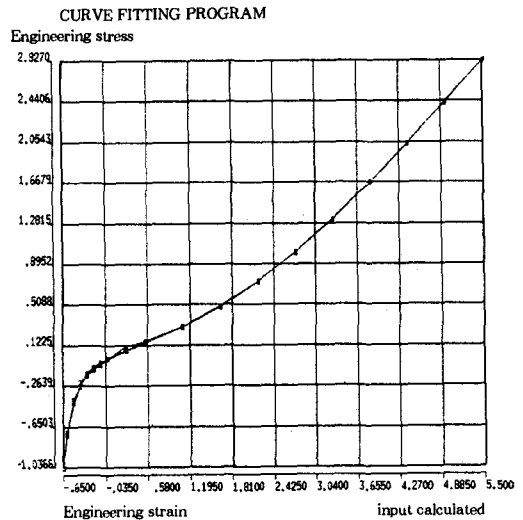


Fig. 3. Curve fitting by Ogden model II.

으며, Fig. 1과 2는 각 시험 데이터를 5항 Mooney-Rivlin 함수와 3항 Ogden 함수로 피팅한 결과를 보여준다. Fig. 3은 1축 인장압축 시험데이터만을 이용하여 Ogden 함수로 피팅한 결과이다. Table 1은 각 상수 값을 보여준다.

III. Strut insulator 유한요소해석

Strut rubber insulator는 프레스 가공된 상하 두

Table 1. Constants of Strain Energy Functions

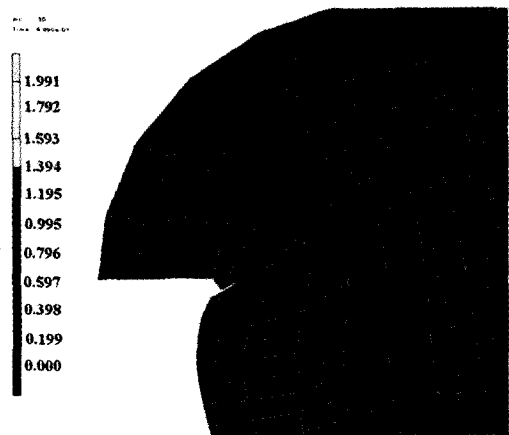
| Mooney-Rivlin Model | Ogden Model I (using all test data) | Ogden Model II (using uni-axial test data) |
|---------------------|-------------------------------------|--|
| $C_{10}=0.0207$ | $\mu_1 = 0.051,$ | $\mu_1=0.00361,$ |
| $C_{01}=0.0234$ | $\alpha_1 = 3.07$ | $\alpha_1 = 4.70$ |
| $C_{11}=0.0$ | $\mu_2=-0.0117,$ | $\mu_2=0.104,$ |
| $C_{20}=0.00389$ | $\alpha_2 = -2.38$ | $\alpha_2 = 2.30$ |
| $C_{30}=0.0$ | $\mu_3=-1.87 \times 10^{-6},$ | $\mu_3=0.40 \times 10^{-6},$ |
| | $\alpha_3 = -15.62$ | $\alpha_3 = -15.62$ |
| | Bulk Modulus = 1.84×10^6 | Bulk Modulus = 2.56×10^5 |

개의 원통형 판재 사이에 고무가 접촉되어 있으며 축대칭 형상을 지니고 있다. 사용된 고무의 재질은 천연 고무이다.

동 부품의 유한요소해석은 비선형 및 접촉 문제 해석이 용이한 상용 유한요소코드인 MARC ver. K6.2를 이용하였으며, HP9000 C180 기종에서 수행하였다. 계산의 편의를 위해 2차원 축대칭 요소를 이용하여 모델링하였으며, full-Herrmann formulation quad 4요소를 사용하였다.¹² 하중이 커짐에 따라 접촉이 발생할 것으로 예상되는 부위는 contact body로 지정하였으며, 계산 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 이 부위에서는 요소를 좀 더 작게 분할하였다. Fig. 4는 유한요소모델을 보여주며, 2740개의 절점과 2254개의 요소로 구성되어 있다.

Fig. 5와 6은 각각 압축방향으로 10mm, 인장방향

으로 5mm의 변위를 주었을 때의 변형 모습과 응력 분포를 보여준다. Fig. 7과 8은 각 경우에 대한 최대 변형률 분포를 보여준다. 응력 및 변형률 집중이 발생



(a) A portion

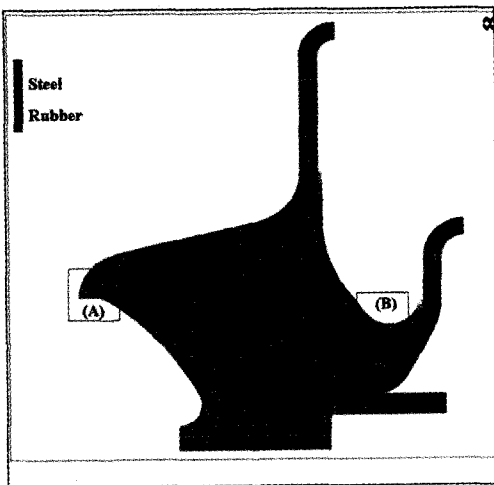
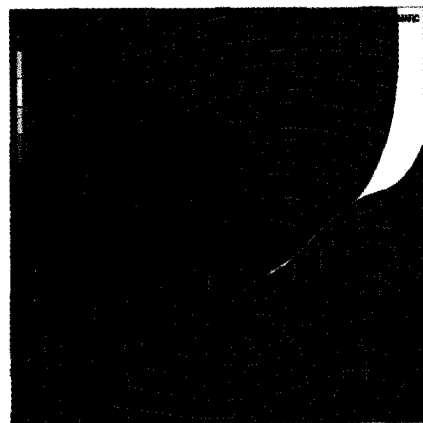


Fig. 4. Finite element model.



(b) B portion

Fig. 5. Cauchy stress distribution under compression displacement 10mm.

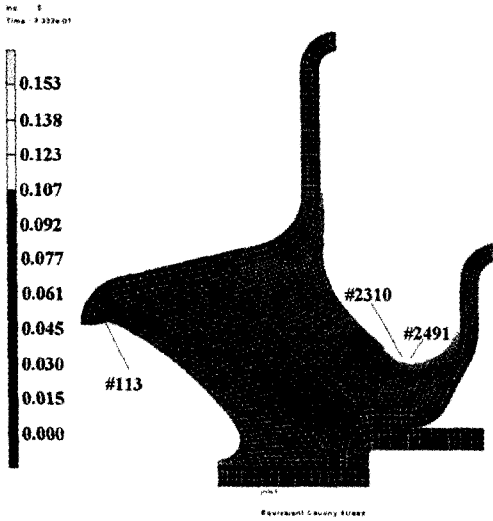


Fig. 6. Cauchy stress distribution under tension displacement 5mm.

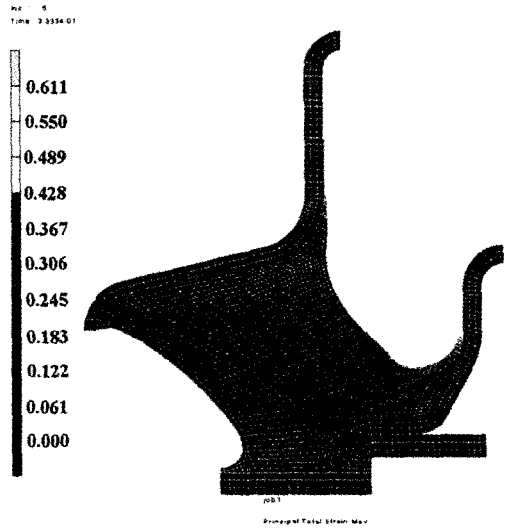


Fig. 8. Max. principal strain distribution under tension displacement 5mm

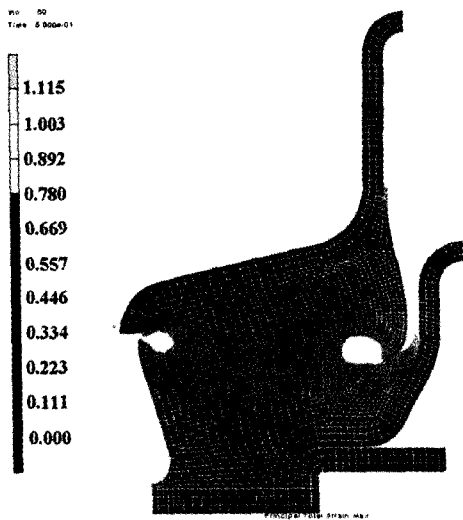


Fig. 7. Max. principal strain distribution under tension displacement 10mm.

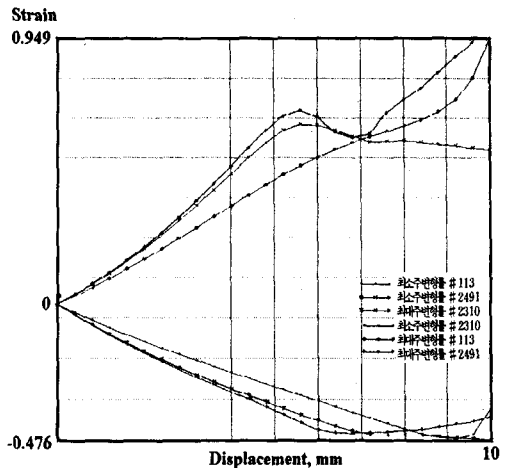


Fig. 9. Displacement vs. principal strain under compression load.

되는 부위는 길 판재와 고무가 접촉되는 부위(Fig. 5의 (a))와 고무가 심한 변형을 일으켜 서로 접촉되는 부위(Fig. 5의 (b))이다. 두 군데의 변형률 차이는 크지 않으나 압축 시는 전자, 인장 시는 후자의 위치에서 최대 변형률 값을 나타내었다. Fig. 9와 10은 응력 집중이 발생하는 세 지점, 즉 피로파손의 우려가

있는 지점에서의 변위변화에 따른 변형률의 변화를 보여준다. 절점 113은 길 판재와 접촉되는 지점이며, 절점 2310과 2491은 고무가 서로 접촉되는 부위에서 인장 및 압축 시 각각 최대 변형률 값을 가지는 지점이다. 그림으로부터 변형률의 진폭이 가장 큰 곳은 절점 2310으로서 서로 접촉되어 접혀지는 지점으로서 피로시험에서의 파손 부위와 잘 일치하였다.

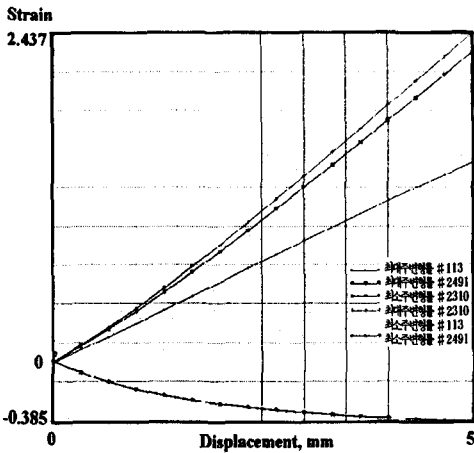


Fig. 10. Displacement vs. principal strain under tension load.

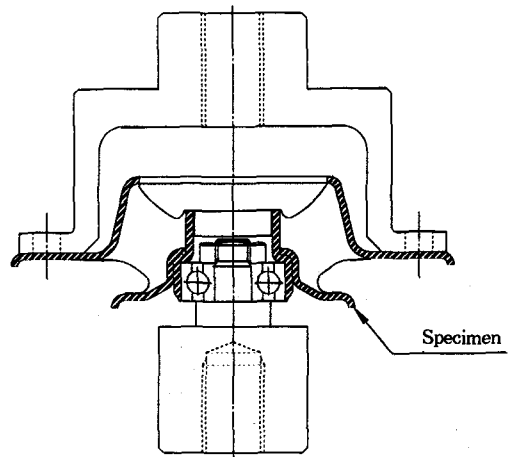


Fig. 12. Schematic of strut insulator fatigue test.

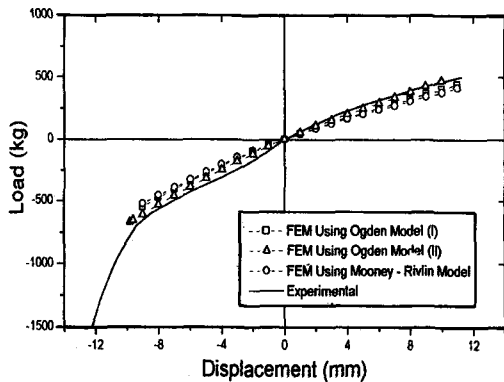


Fig. 11. Load-displacement curves.

Fig. 11은 정적시험과 유한요소해석으로부터 구한 하중-변위 관계선도이다. 유한요소해석은 고무의 모델을 Table 1에서 보여 준 3가지에 대해 수행하였다. 고무 모델에 따라 하중-변위 관계가 약간 다르게 나타남을 알 수 있으며, 인장-압축 데이터만으로 Ogden 상수를 구한 해석 결과가 시험 결과와 가장 잘 일치하였다. 그 이유는 본 부품의 경우 변형 양상이 인장 압축모드가 지배적이며 Ogden model II가 고무의 인장 압축 관계를 가장 잘 나타내 주는데 있는 것으로 추측된다.

IV. 피로수명시험

시험 대상품인 strut insulator는 승용차의 쇼크업소버를 차체에 고정하는 부위에 설치되는 방진부품으로서 차량 주행 중 특히 곡선로 주행과 요철로 등을 통과할 때 큰 하중이 가해지게 되며 차량의 수명동안 피로가 누적되게 된다. 일반적으로 자동차 부품은 내구성 평가를 위해서 피로수명시험을 통해 구한 하중-수명 선도로 부터 외부하중에 대해 충분한 안전한 피로수명을 가지도록 설계되어 진다. 본 연구에서는 피로수명시험을 실시하여 하중-수명선도를 구하고, 피로파손 양상을 분석하여 유한요소해석 결과로부터 예상되는 취약부위와 비교검토하였다.

피로시험 시편은 재료시험에 사용된 고무와 같은 물성을 지닌 소재를 사용하였으며, 피로시험은 INSTRON사의 유압식피로시험기인 10톤 용량의 8501시리즈를 이용하였다. Fig. 12는 시험장치의 개략도로서 시편 윗쪽 그림은 시험기의 로드셀에 고정되며 아래쪽 그림은 액추에이터에 고정된다. 피로시험은 압축하중을 1500kgf를 일정하게 유지한 상태에서 인장쪽 하중을 250kgf에서 700kgf까지 변화시켜가면서 실시하였으며, 육안으로 확인된 균열의 길이가 20mm 이상이 되거나 스프링 정수의 변화율이 20% 이상이 되었

Table 2. Fatigue Test Results

| Sample ID | Max. load (kgf) | Min. load (kgf) | Load amplitude (kgf) | Fatigu life (cycles) |
|-----------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 250 | -1,500 | 875 | 549,500 |
| 2 | 300 | -1,500 | 900 | 398,400 |
| 3 | 350 | -1,500 | 925 | 360,700 |
| 4 | 400 | -1,500 | 950 | 246,000 |
| 5 | 500 | -1,500 | 1,000 | 65,300 |
| 6 | 600 | -1,500 | 1,050 | 26,700 |
| 7 | 700 | -1,500 | 1,100 | 9,000 |

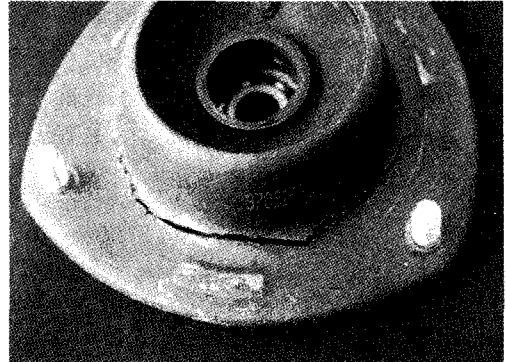


Fig. 15. Fatigue failure on plate.

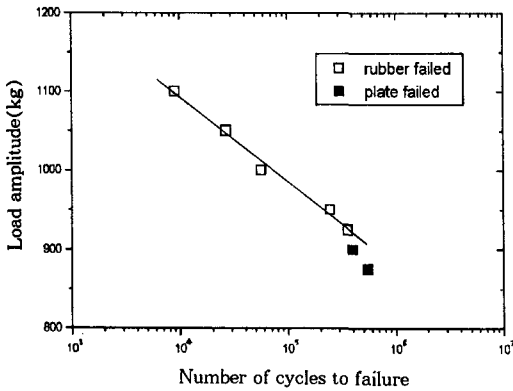


Fig. 13. Load vs. fatigue life curve.

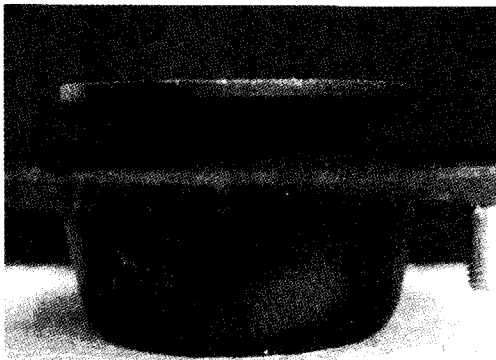


Fig. 14. Fatigue failure on rubber.

을때 까지의 반복횟수를 피로수명으로 간주하였다.

Table 2는 시험하중과 피로수명과의 관계를 보여준다. Fig. 13은 시험하중 진폭과 피로수명과의 관계선도이며, 하중 진폭이 커질수록 피로수명이 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 피로파손이 발생된 위치는 고

무가 서로 접촉하여 접혀지는 부위로서 유한요소해석 결과에서 보여준 최대변형률 발생지점과 잘 일치하였다. 시편 1과 2는 시편의 고무 부위에는 파손이 발생되지 않았으며, 걸 판재의 필렛 부위에서 피로파손이 발생하였다. 이 부위는 압축하중이 작용할때 상당히 큰 응력이 발생되어 전형적인 금속의 피로파손 양상을 나타내었다. 이러한 현상은 걸 판재의 하중-수명 기울기가 고무의 경우보다 더 커 하중진폭이 925kgf 이상에서는 판재가 파손되기 이전에 고무가 먼저 파손되었으나 900kgf 이하에서는 고무보다 판재가 먼저 파손되는 것으로 추측된다. Fig. 14와 15는 각각 고무에서 피로파손이 발생된 시편의 모습과 걸 판재에서 피로파손이 발생된 시편의 모습을 보여준다.

V. 결 론

자동차의 고무부품인 strut rubber insulator의 특성을 평가하기 위하여 유한요소해석과 피로수명시험을 실시하였으며 아래의 결론을 얻었다.

1) 고무물성 평가를 위해 1축 인장압축 및 전단시험으로부터 응력-변형률 관계를 얻었으며, 변형률에너지함수의 계수를 구하였다.

2) 고무의 유한요소해석 결과는 고무 물성 모델에 따라 차이가 있으며, 1축 인장압축테이타 만으로 구한 Ogden 모델을 이용한 유한요소해석 결과가 시험결과와 가장 근접하였다.

3) 유한요소해석 결과로부터 동 부품의 취약 부위는 가장 큰 변형률 값을 갖는 고무가 서로 접촉되어 접혀지는 지점으로 나타났다.

4) 부품의 피로수명시험 결과로부터 하중-수명 관계를 얻었으며, 피로파손 부위는 유한요소해석 결과로부터 예측된 부위와 잘 일치하였다.

이상으로부터 고무 부품의 변형 거동 및 응력해석에 유한요소해석 방법이 잘 적용될 수 있으며, 나아가 시편 상태의 정확한 변형률 및 응력해석과 피로수명데이터를 이용하면 부품의 피로수명 예측도 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부임을 밝히며, 연구에 협조해 주신 평화산업(주)에도 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Smith, E. H., *Mechanical Engineer's Reference Book*, 12th ed., p. 7/146, 1994.
2. Jankovich, E., Jomaa, M., "FE Stress Analysis of Rubber Automotive Parts Including Friction," SAE 910024.
3. 김현영, 우창수, 김완두, 이중원, "Computer Simulation of the Behavior of CV Joint Boot,"

IPC-8, 9531354, 2, pp. 353-358.

4. 김세호, 이형욱, 허훈 외, "등속조인트 부트의 유한요소해석 및 설계 변경에의 응용," 한국자동차 공학회, 추계학술대회 9638206, pp. 323-328, 1996.
5. 신수정, 오수익, 이태수, "고무패드 성형법의 유한요소모델링," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 (I), pp. 331-336, 1997.
6. Takeuchi, K., "Fatigue Test Tech. of Rubber Materials for Vibration Insulators and Their Evaluation," IPST, Vol. 20, No. 10, pp. 64-69, 1993.
7. 박현철, 윤성기, "가황고무의 변형에너지 함수를 통한 재료의 특성화 방법에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제16권 7호, pp. 1341-1350, 1992.
8. Treloar, L. R. G., *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd ed., 1975.
9. Gent, A., N., *Engineering with Rubber*, Hanser Pub., p. 47, 1992.
10. *Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers*, MARC Analysis Research Corporation, 1996.
11. Brown R. P., *Physical Testing of Rubber*, 3rd ed., Chapman & Hall, p. 109, 1990.
12. MARC Vol. A User Information, MARC Analysis Research Corporation, 1994.